DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.04.009

# $\phi$480×900 高镍铬离心复合轧辊熔合不良的成因及控制

杨智强[1],吕潍威[1],苏　晨[1],郭红星[2]
(1.昆明工业职业技术学院 电气学院,云南 安宁 650302; 2 云南昆钢重型装备制造集团有限公司,云南 安宁 650302)

**摘　要**:工作层与芯部的熔合不良是 $\phi$480×900 高镍铬无限冷硬球墨铸铁轧辊产品中最主要的铸造缺陷,该缺陷一般难于修复而直接导致轧辊报废。对 $\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊熔合不良缺陷分析发现,工作层离心浇注停机温度偏低、静态浇注填芯速度慢是造成熔合不良的主要原因。浇注工作层铁液时"O"型玻璃渣加入过量、芯部铁液浇注的温度过低、铁液纯净度差,也会造成熔合不良缺陷。针对上述原因提出防治措施:根据产品尺寸及工艺设计措施,合理加入"O"型玻璃渣;离心机停机要选择在工作层金属结晶平台温度以下 10~20 ℃;采用顶注法浇注芯部铁液,温度控制在 1 385~1 410 ℃;减少离心机停机到芯部铁液浇注的时间间隔,可以有效防治工作层与芯部的熔合不良。

**关键词**:熔合层不良;离心复合铸造;高镍铬轧辊
**中图分类号**: TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)04-0283-04

# Cause and Control of Poor Fusion of High N-Cr Centrifugal Compound Rolls of $\phi$480×900

YANG Zhiqiang[1], LYU Weiwei[1], SU Chen[1], GUO Hongxing[2]
(1. School Electrical, Kunming Industrial Vocational and Technical College, Anning 650302, China; 2. Yunnan KISC Heavy Equipment Manufacturing Group Co., Ltd., Anning 650302, China)

**Abstract**: The bad fusion between the working layer and the core was the most important casting defect in $\phi$480×900 high Ni-Cr infinite cold ductile iron rolls. This defect was usually difficult to repair and directly leads to scrap of the rolls. The analysis of the defects of the high Ni-Cr infinite chilled cast iron roll of the 480×900 centrifugal composite casting has found that the main causes of bad fusion were low centrifugal pouring stop temperature and slow static pouring core filling speed in the working layer. When pouring molten iron in the working layer, excessive addition of 'O' type glass slag, too low casting temperature of molten iron in the core and poor purity of molten iron would also cause bad fusion defects. According to the above reasons, the prevention and control measures were put forward: according to the product size and process design measures, reasonable adding 'O' type glass slag; Centrifuge shutdown should be selected in the working layer of metal crystallization platform temperature below 10~20 ℃; The molten iron in the core was poured by top injection method and the temperature was controlled in the range of 1 385~1 410 ℃. The results show that reducing the time interval between centrifuge shutdown and molten iron pouring at the core can effectively prevent the bad fusion between the working layer and the core.

**Key words**: poor fusion layer; centrifugal composite casting; high nickel-chromium roll

高镍铬无限冷硬铸铁轧辊以其良好的耐磨性、抗粘性、抗热裂性和抗剥落性在热轧带钢连轧机精轧机组上得到广泛应用,目前仍是国内外热轧带钢连轧机组精轧工作辊的最主流选择[1]。国内外对该材质轧辊由深入的研究,并随着科技进步进行了很多改进,使轧辊的成分设计、金相组织设计、离心复合铸造技术、热处理工艺、机械加工精度的控制、轧辊使用控制都达到了较高且相对成熟的水平。

高镍铬无限冷硬铸铁轧辊采用离心复合铸造工艺成型,工作层铁液经处理合格后在卧式离心机上通过离心力作用充型和凝固,然后在静态下浇铸芯部铁液。采用离心复合铸造工艺成型的高镍铬无限冷硬铸铁轧辊组织致密、表面硬度均匀、机械性能好、质量稳定、生产成本低。

夹渣、裂纹、气孔、缩孔及偏析离心复合铸造高

**收稿日期**:2021-02-01
**基金项目**:云南省教育厅 2021 年科学研究基金项目(2021J0991)
**作者简介**:杨智强(1983—),云南宾川人,工学硕士,金属材料工程师、讲师.研究方向:金属材料成型及有限元模拟.电话:13608854776,Email:yzq2007202074@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

镍铬无限冷硬铸铁轧辊常见的缺陷,影响轧辊的力学性能和使用性能,是生产过程中控制的难点[2-3]。A轧辊企业为某轧钢生产线研制开发热带连轧精轧机架用 $\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊,在试制过程中,多次出现气孔、裂纹、工作层与芯部的熔合不良等铸造缺陷,其中熔合不良占缺陷总数的 60%。本文作者对 A 轧辊企业生产的热带连轧精轧机架用 $\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊生产中存在熔合不良缺陷的原因及防治措施进行分析并提出防治措施。

## 1 $\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊成型工艺

### 1.1 技术指标

$\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊工作层组织为:贝氏体+少量马氏体+残余奥氏体+石墨+碳化物,硬度为 70~80 HSD;芯部材质为高韧性球墨铸铁,辊颈硬度为 35~55 HSD,抗拉强度≥530 MPa;成品辊身工作层设计厚度 42~46 mm。热带连轧存在高温、高负荷、高速度等恶劣工况条件,因此对轧辊的质量要求极为苛刻。为使轧辊工作层具有高的硬度、强度、耐热疲劳性能,芯部具有高的抗拉强度和屈服强度,内外层熔合良好,无夹渣、气孔、裂纹等缺陷,必须严格控制生产工艺过程。

### 1.2 成分设计

$\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊成品化学成分设计如表 1。

$\phi$480×900 轧辊工作层采用高镍铬无限冷硬铸铁热带精轧轧辊的经典成分,并对 Mn、P、S、Mo 的成分做适当调整,芯部材质为高强韧性球墨铸铁。

### 1.3 $\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊生产工艺流程

$\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊工艺流程如图 1。下面就几个关键工序做简单介绍。

#### 1.3.1 冷型涂料挂料

冷型涂料为石英粉(7.5 kg)+膨润土(0.4 kg)+水(6.0 kg)。冷型挂料温度:180~200 ℃,挂料冷型转速≥500 r/min,涂料厚度 3.0～3.5 mm,膨润土应在使用前 20 h 用水发开。挂料要求有:涂料层致密,厚度均匀;为确保离心浇注时经住高温金属液体的冲刷,涂料应选择滚涂,在操作过程中要注意对涂料的充分搅拌,防止因涂料本身不均匀影响使用。

#### 1.3.2 熔炼

$\phi$480×900 高镍铬无限冷硬球墨铸铁轧辊工作层铁液及芯部铁液熔炼分别采用 3、5 t 中频感应炉熔炼。工作层配料为低 P、低 S 的新生铁、无锈蚀优质废钢、回炉料(用量大于 35%)、低碳铬铁、钼铁、镍板。熔炼时,按照成分要求依次将上述原料放入中频炉,熔清以及第 1 次取样后、铁液出炉前分别采用碎玻璃进行 3 次造渣和扒渣操作,铁液出炉前还要加入锰铁颗粒进行脱氧,二次取样检验,采用 SpectroMAxx 立式直读光谱仪检验成分,成分调整合格即可出炉,工作层铁液出炉温度为 1 420~1 430 ℃,在铁液包底放入镍镁合金 +Mg8RE7,采用包底冲入法对铁液进行球化处理,将 FeSi75 (粒度为 10~30 mm)置于球化剂上方,对铁液进行孕育处理,如

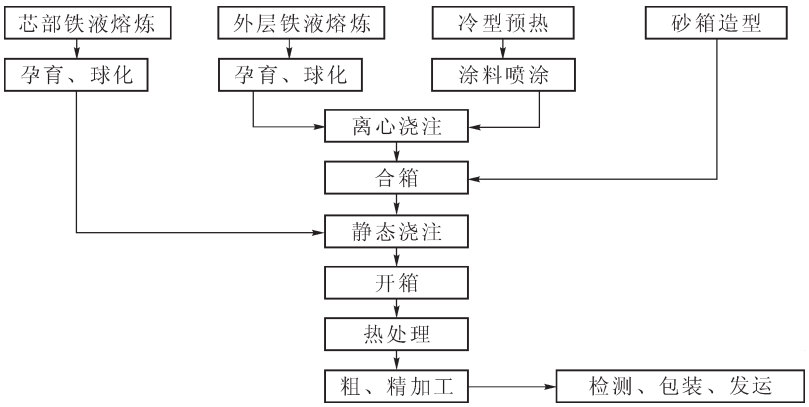


图 1 生产工艺流程
Fig.1 Flow chart of production process

**表 1 $\phi$480×900 高镍铬钼无限冷硬球墨铸铁轧辊成分表 $w$(%)**
**Tab.1 Chemical composition of $\phi$480×900 high Ni–Cr–Mo unlimited chilled ductile iron roll**

| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Mg | RE | Bi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 工作层 | 3.20~3.40 | 0.80~1.00 | 0.70~0.90 | ≤0.09 | ≤0.03 | 1.75~1.90 | 0.30~0.40 | 4.20~4.40 | | 0.15 | |
| 芯部 | 3.10~3.40 | 1.90~2.50 | 0.40~0.60 | ≤0.10 | ≤0.03 | 0.25~0.35 | 0.05~0.10 | 0.15~0.25 | ≥0.04 | 0.01~0.04 | 0.01~0.02 |

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

果第一次取样检测原铁液含硫量大于 0.025%时，要进行脱硫处理。

芯部熔炼配料为经过筛选的普通废钢、生铁、低碳铬铁、镍板。熔炼时，生铁要放于底层，然后依次放入普通废钢、低碳铬铁、镍板。熔清后要造渣和扒渣，铁液出炉温度为 1 490~1 500 ℃，取样检验，SpectroMAxx 立式直读光谱仪检验成分。出炉时，在铁液包底放入钇基重稀土镁合金 +Mg8RE7，覆盖铁屑，采用包底冲入法对铁液进行球化处理。

**1.3.3**　浇注

$\phi$480×900 高镍铬无限冷硬球墨铸铁轧辊工作层在卧式离心机上离心浇注成型。将已经滚挂涂料并烘干至 300 ℃左右的铸型置于离心机拖轮上，浇注时冷型温度在 160~200 ℃，离心机罩密封良好，避免空气流通，冷型转速根据公式(1)计算[4]：

$$n=\beta\frac{55\ 200}{\sqrt{rR}} \tag{1}$$

式中，$n$ 铸型转速，r/min；$R$ 铸型内表面半径，m；$r$ 合金重度，N/m$^3$；$\beta$ 调整系数(1.2~1.5)。

经计算，$\phi$380×650 轧辊工作层浇注时转速控制为 700 r/min。

将 1 340~1 360 ℃的工作层铁液注入水平高速旋转的铸型内，为防止工作层内表面氧化，在工作层浇注完毕后立即从冷型两端倒入 50~80 ℃的“O”型玻璃渣(4.2 kg)，采用远红外测温仪测温，待内表面温度降至结晶温度以下 10 ℃，离心机缓慢减速至停机。离心机停止旋转将铸型从离心铸造机移去，竖直起吊放置在到铸型坑内，调整上下辊颈铸型，顶注法浇注 1 360~1 380 ℃芯部铁液，FeSi75(粒度为 10~30 mm)随流孕育。浇铸完毕后在铸型坑内进行冷却，待冷却到一定温度后开箱得到高镍铬无限冷硬球墨铸铁离心复合轧辊毛坯。

## 2　$\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊熔合不良缺陷分析

对产生熔合不良缺陷的轧辊进行分析，不熔合层处于工作层内圆位置，呈规则的圆弧状，有大量石英粉、砂子等非金属夹杂物，以及铁渣、金属氧化皮，导致内外层熔合不良。如图 2。

针对出现的缺陷情况，查阅浇注记录卡，记录如下：工作层离心浇注停机时间为 2 376 s，工作层停机温度 1 035 ℃，2 537 s 配箱完毕，2 575 s 开始静态浇注，芯部铁液浇注温度为 1 362 ℃，浇注时间 103 s，“O”型玻璃渣加入时事先未进行预热。

参照 $\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊生产工艺标准，发现以下问题：①工作层离心浇注停机温度偏低，停机时，工作层温度应在 1 040~1 060 ℃；②静态浇注填芯速度慢。

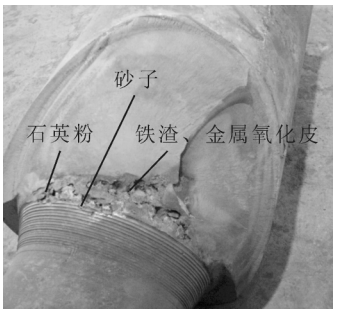


图 2　$\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊熔合不良缺陷位置

Fig.2　Defect location of bad fusion of high Ni-Cr infinite chilled cast iron roll in $\phi$480×900 centrifugal composite casting

综合上①、②发现，工作层离心浇注停机温度偏低是造成结合层熔合不良的原因，离心机停机要选择在工作层金属结晶平台温度以下 10~20 ℃，高于此范围，工作层铁液未能完全凝固，容易发生垮塌；低于此范围，“O”型玻璃渣在芯部铁液浇注时难以熔化及上浮，出现熔合不良现象。

除工作层离心浇注停机温度偏低以外，以下情况也会造成熔合不良[5]。

(1)浇注工作层铁液时“O”型玻璃渣加入过量　在工作层钢液浇注完毕后，根据工艺要求倒入“O”型玻璃渣覆盖在工作层内表面，其目的是在高温作用下，玻璃渣熔化形成一层致密的保护膜，从而使工作层和芯部能够实现良好的冶金熔合。“O”型玻璃渣加入量跟工作层内径有关，如果玻璃渣加入量过少，则工作层内表面不能得到有效覆盖，高温下产生氧化皮，极易造成结合层大面积夹渣，导致熔合不良。

(2)芯部铁液浇注的温度过低　芯部铁液浇注的温度要严格执行工艺设计，浇注温度过高，有利于“O”型玻璃熔渣和其他氧化渣上浮，但是工作层受冲刷效果明显，过高的温度会使已经凝固的工作层熔化，导致工作层厚度达不到设计要求；浇铸温度过低，不利于氧化渣及“O”型玻璃熔渣上浮，致使大量“O”型玻璃熔渣和其他氧化渣分布于结合层上，造成熔合不良。

(3)离心机停机到芯部铁液浇注的时间间隔(配箱时间)长　离心机停机到芯部铁液浇注的时间间隔过长，工作层内表面及芯部铁液的温度都会降低，氧化渣及“O”型玻璃熔渣难以熔融，致使二者不能有效上浮，停留在结合面，导致熔合不良。

(4)铁液纯净度差　工作层铁液和芯部铁液

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

纯净度差时，会在冷却凝固时析出杂质，沉积在熔合层时形成熔合层夹杂缺陷。高镍铬无限冷硬球墨铸铁轧辊熔合层夹杂缺陷的夹杂物主要来源是保护渣，以及熔炼过程种加入的脱氧产物和浇注过程中铁液和空气的二次氧化产物，是造成熔合层夹杂的重要原因。

防止熔合不良缺陷的措施：

(1)根据产品尺寸及工艺设计措施，合理加入“O”型玻璃渣。

(2)离心机停机要选择在工作层金属结晶平台温度以下 10~20 ℃。

(3)采用顶注法浇注芯部铁液，温度控制在 1 385~1 410 ℃。

(4)减少离心机停机到芯部铁液浇注的时间间隔。实践证明，$\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊配箱时间控制在 3 min 以内，可以工作层及球墨铸铁芯部得到良好的冶金熔合。

## 3 结论

$\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊熔合不良的原因有工作层停机时温度、铁液纯净度、离心冷型涂料、“O”型玻璃渣加入量浇注芯部铁液的温度及离心机停机到芯部铁液浇注的时间间隔联合因素等。为了确保 $\phi$480×900 离心复合铸造高镍铬无限冷硬铸铁轧辊工作层具有高的硬度、强度、耐热疲劳性能，芯部具有较高的抗拉强度和屈服强度，工作层和芯部冶金熔合良好，无夹杂缺陷，必须按照工艺规程组织生产，保证原材料优质可靠，控制好铁液纯净度、离心铸造过程及好配箱时间，在生产实践中不断优化工艺设计，确保生产出优质的轧辊产品。

**参考文献：**

[1] 彭展南，杨帅. 钒含量对含铌高镍铬无限冷硬铸铁组织及耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(11):6-11.
[2] 陈兴富，董国卿，孙建勋，等. 离心铸造高镍铬复合轧辊中夹杂物分析[J]. 铸造, 2017, 66(11):1213-1215，1219.
[3] 蒋一. 离心铸造高硼高速钢辊环组织及性能研究[D]. 昆明：昆明理工大学, 2013.
[4] 符寒光. 高速钢轧辊制造技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007.
[5] 杨智强，起华荣，郭红星，等. 高镍铬钼无限冷硬球铁轧辊熔合层夹杂缺陷形成原因及预防 [J]. 铸造技术, 2018, 39(6): 1271-1273.

(上接第 282 页)

效、降低污染。

(2)可取代普通覆膜砂壳型铸钢工艺，无需喷涂且可裸浇，减少工序且显著降低成本，降低污染，提升工作环境质量。

(3)可取代宝珠砂铸钢工艺，壳(芯)型轻量化且显著降低生产成本。

**参考文献：**

[1] 李荣德，米国发. 铸造工艺学[M]. 北京：机械工业出版社, 2013.
[2] 黄天佑. 铸造手册：造型材料(第 4 卷)(第 3 版)[M]. 北京：机械工业出版社, 2012.
[3] 韦幸，马江达，黄启丁，等. 铸造烧结陶粒砂在实际生产中的应用[J]. 装备制造技术，2019(2): 146-149.
[4] 杨小平，郭永斌，刘轶，等. 陶粒砂与硅砂在 3D 打印砂型中的性能对比研究[J]. 现代铸铁，2019(4): 46-48.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1 铸铁件均衡凝固与有限补缩；2 铸铁件冒口补缩设计及应用；3 压边浇冒口系统；4 浇注系统大孔出流理论与设计；5 铸件均衡凝固工艺；6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7 浇注系统当冒口补缩设计方法；8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：280元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　技术咨询：13609155628

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net